

[논문] 태양에너지
Solar Energy
Vol.17. No.3, 1997

성층 온수 저장 중 과도 열거동과 축열효율에 관한 연구

박이동*, 주용진**, 김영현***

- * 성균관대학교 기계공학과
- ** 한전 전력 연구원
- *** 포항제철주식회사

A Study on Transient Thermal Behavior During the Charging Process in a Stratified Water Storage Tank and Its Storage Efficiency

E. T. Pak*, Y. J. Chu**, Y. H. Kim***

- * *Sung Kyun Kwan University*
- ** *Korea Electric Power Research Institute*
- *** *Pohang Iron & Steel Co. Ltd.*

요 약

장기 성층 온수 저장조 내의 중간 경계면에서 전달되는 열량을 예측하기 위하여 이론식을 유도 확립하고 이론적인 축열효율을 구하였다.

그리고 이론 축열효율값과 비교 고찰하기 위하여 여러 실험 조건을 통한 실제 축열효율을 구하였고, 저장조 내의 중간 경계면에서 일어나는 혼합정도를 효과적으로 해석하기 위하여 유효 열확산 계수를 정량화하였다.

중간 경계면에서 열전도에 의한 손실이 일회 충수 시간이 짧을수록 즉, Pe 수가 증가할 수록 많이 발생함을 알았다.

Abstract

In this study, the theoretical equation of thermal storage efficiency was established to applied long term hot water storage system.

The effective thermal diffusivity and storage efficiency were measured through the experiment to predict the degree of mixture in thermal storage tank.

The effective thermal diffusivity was inversely preportional to the storage efficiency. The most effective storage efficiency was obtained under condition of low flow rate and using the perforated distributor.

Nomenclature

- Fo : Fourier number, $Fo = t\alpha/H^2$
 H : Vertical distance between inlet and outlet(m)
 Pe : Peclet number, $Pe = UH/\alpha$
 Pr : Prandtle number, $Pr = \nu/\alpha$
 Re : Reynolds number, $Re = UH/\nu$
 t : Arbitrary time (sec)
 tx : Turnover time (sec)
 U : Mean vertical velocity in the tank(m/sec)
 α : Effective thermal diffusivity (m^2/sec)
 ν : Kinematic viscosity (m^2/sec)
 θ : Dimensionless temperature,
 $\theta = (T-Ts)/(T_{in}-Ts)$
 η : Thermal storage efficiency
 τ : Dimensionless time, $\tau = t/t_x$

1. 서 론

현재 주된 에너지원으로 사용되고 있는 화석 연료는 그 매장량이 한정되어 있어서 현재와 같은 추세로 소비할 경우 가까운 장래에 고갈될 위험에 처해있다. 또 화석 연료 사용에 의한 스모그 현상, 온실효과, 산성비 등과 같은 공해 문제와 원자력 에너지의 이용에 대한 안전성 문제가 전

세계적으로 대두되고 있다.^(1, 2, 3) 이러한 문제를 해결할 수 있는 대체 에너지원으로서 고갈될 우려가 없고 무공해이며 안전한 태양열 에너지가 현재 가장 주목받고 있으며, 에너지의 효율적인 집열 뿐만아니라 부하요구시에 적절하게 에너지를 공급하기 위해서는 저장 문제가 더욱 중요하게 된다. 따라서 새로운 에너지원의 개발과 더불어 에너지 공학자들의 관심을 불러 일으키는 분야로서 에너지의 효과적인 저장에 관한 연구가 현재까지 진행되어 왔다.^(4, 5, 6)

열 에너지의 성층 온수 저장 시스템에서 실질적 이용의 중요한 관건 중의 하나는 열 성층 (thermal stratification)을 얼마나 효과적으로 형성·유지시키는가에 있으며 이는 전체 시스템의 효율면에서 매우 큰 영향을 미친다.^(7, 8, 9)

따라서 본 연구에서는 장기 성층 온수 저장 과정 중 고온의 유입수에서 저온의 초기 저장수로 전도되는 열량을 예측하여 이론 축열효율식을 유도·확립하고, 온수 저장 과정 중 동적인자인 유입 유동율을 0.4, 0.6, 0.8LPM으로, 기하학적 인자인 유입구 형상을 단순 원형관과 perforated distributor로 변화시켜 가며 실험을 수행하여 각각에 대하여 성층 파괴 정도를 나타내는 유효 열확산 계수(effective thermal diffusivity)를 정량화하고, 축열효율이 가장 좋은 경우를 제시하여 장기 성층 온수 저장의 기초 설계 자료

로 활용하고자 한다.

2. 이론 축열효율식 정립

저장조 내의 시간과 공간의 함수인 온도 분포를 편리하게 해석하기 위하여 다음과 같은 가정을 한다.

- ① 저장조 내의 유동은 일차원 유동이다.
- ② 저장되는 동안에 유입 유동율과 유입수 온도는 일정하다.
- ③ 중간 경계면에서의 교란은 무시한다. 즉 피스톤 유동이다.
- ④ 주위로의 열손실은 무시한다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (1)$$

$$T(x,0) = T_s$$

$$T(0,t) = T_{in}$$

$$T(\infty,t) = T_s$$

U : 저장조의 횡단면적에 대한 평균 속도 (m/sec)

T_s : 초기 저장수의 온도 (°C)

T_{in} : 유입수의 온도 (°C)

위의 지배 방정식과 초기 및 경계조건을 단순화하기 위해서 다음과 같이 무차원화한다.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} + u \frac{\partial \theta}{\partial \zeta} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \zeta^2} \quad (2)$$

$$\theta(\zeta,0) = 0$$

$$\theta(0,\tau) = 1$$

$$\theta(\infty,\tau) = 0$$

여기서 각각의 무차원 변수는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{무차원 시간: } \tau = \frac{t\alpha}{H^2} = Fo \quad (3)$$

$$\text{무차원 높이: } \zeta = \frac{x}{H} \quad (4)$$

$$\text{무차원 속도: } u = \frac{UH}{\alpha} = Pe \quad (5)$$

$$\text{무차원 온도: } \theta = \frac{T - T_s}{T_{in} - T_s} \quad (6)$$

무차원 지배 방정식과 무차원 초기 및 경계조건에 Laplace 변환은 다음과 같다.

$$\frac{d^2 \theta}{d\zeta^2} - u \frac{d\theta}{d\zeta} - s\theta = 0 \quad (7)$$

$$\theta(0, s) = 1/s$$

$$\theta(\infty, s) = 0$$

여기서 $\theta(\zeta, s)$ 는 Laplace 변환된 $\theta(\zeta, \tau)$ 를 나타낸다.

식 (7)을 풀면,

$$\theta(\zeta, s) = \frac{1}{s} \exp\left(\left(\frac{u}{2} - \sqrt{\left(\frac{u}{2}\right)^2 + s}\right)\zeta\right) \quad (8)$$

식 (8)의 역변환은 다음과 같이 표현된다.

$$\theta(\zeta, \tau) = \exp\left(\left(\frac{u}{2}\right)\zeta\right) \int_0^\tau F(\tau) d\tau \quad (9)$$

여기서

$$F(\tau) = L^{-1}\left(\exp\left(-\left(\frac{u}{2}\right)^2 + s\right)\zeta\right) \quad (10)$$

식 (9)를 풀기 위해서 Laplace 변환에 대한 Inversion 정리와 Laplace 역변환을 사용하여 정리하면 다음과 같다.

$$\theta(\zeta, \tau) = \int_0^\tau \frac{\zeta}{\sqrt{4\pi\tau}} \exp\left(-\frac{(\zeta - u\tau)^2}{4\tau}\right) d\tau \quad (11)$$

식 (11)은 ζ 의 적분항을 포함하여 몇가지 수학적 처리를 통하여 $\theta(\zeta, \tau)$ 의 해를 구할 수 있다.

$$\theta(\zeta, \tau) = \int_0^\tau \left(\frac{\zeta + u\tau}{\sqrt{4\pi\tau^3}} - \frac{u}{\sqrt{4\pi\tau}} \right)$$

$$\begin{aligned} & \exp\left(-\frac{(\xi-u\tau)^2}{4\tau}\right) d\tau \\ &= \operatorname{erfc}\left(\frac{\xi-u\tau}{\sqrt{4\tau}}\right) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^\tau \frac{u}{2\sqrt{4\tau}} \\ & \exp\left(-\frac{(\xi-u\tau)^2}{4\tau}\right) d\tau \quad (12) \end{aligned}$$

여기서 erfc 는 Gauss 여오차함수이고 $(\xi - u\tau)$ 항은 피스톤 유동의 중간 경계면으로부터 떨어진 상대 위치를 의미하며, 식 (12)는 주어진 모든 조건을 만족시킨다. 식 (12)가 더 간략화 될 수 없지만 ξ 와 τ 에 대한 온도 분포는 간단한 수치 적분에 의해서 쉽게 얻어진다.

저장조 내에서 고온의 유입수에서 저온의 초기 저장수로 전도되는 무차원 열유속은 Fourier 법칙으로 결정될 수 있다.

$$\begin{aligned} q^*(\tau) &= \frac{1}{\sqrt{\pi\tau}} - \frac{u^2}{\sqrt{4\tau}} \int_0^\tau \frac{(\tau-\xi)}{\sqrt{4\xi^3}} \\ & \exp\left(-\frac{u^2(\tau-\xi)^2}{4\xi}\right) d\xi \quad (13) \end{aligned}$$

여기서 $q^*(\tau)$ 와 $q(t)$ 의 관계는 다음과 같다.

$$q^*(\tau) = \frac{q(t)}{[k(T_{in} - T_s) / H]} \quad (14)$$

$q^*(\tau)$: 중간 경계면에서 전도되는 무차원 열유속

$q(t)$: 중간 경계면에서 전도되는 열유속 (W/m^2)

고온의 상부에서 저온의 하부로 충수 시간동안 전도되는 무차원 열유속은 다음과 같다.

$$q^*(\tau) = \int_0^{1/Pe} q^*(\tau) d\tau \quad (15)$$

그러므로

$$q^*(\tau) = \frac{q(t)}{[k(T_{in} - T_s)(H/\alpha)]} \quad (16)$$

따라서 완전 성층 유동인 경우 최대로 저장될 수 있는 열량에서 중간 경계면에서 전도에 의한 손실항을 빼주면 다음과 같은 이론 축열효율식을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \frac{M_s C_p (T_{in} - T_s) - q(t) A}{M_s C_p (T_{in} - T_s)} \\ &= 1 - q(\tau) \quad (17) \end{aligned}$$

M_s : 저장수의 전 질량 (Kg)

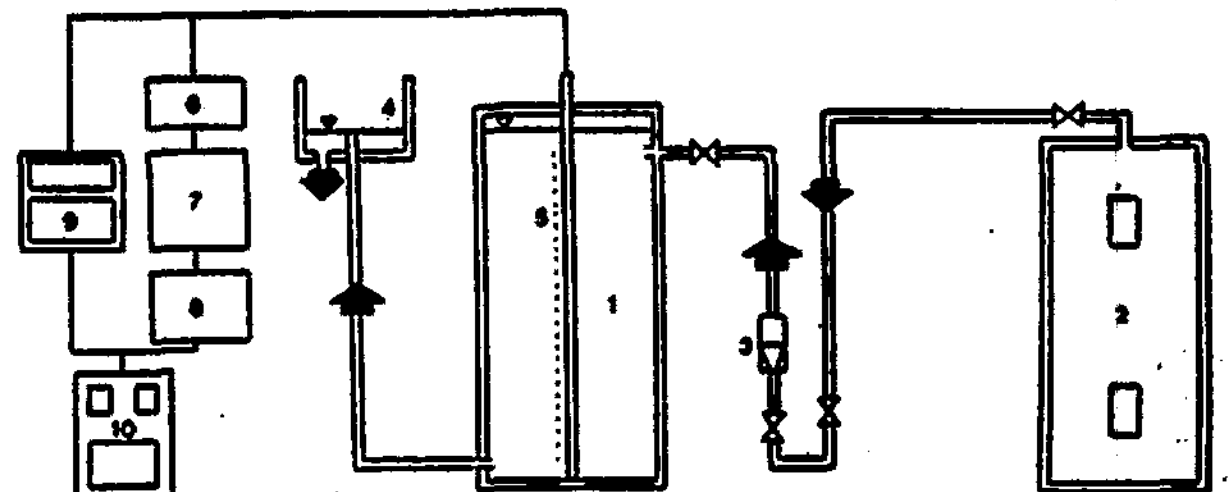
C_p : 정압 비열 ($W/kg \cdot ^\circ C$)

A : 저장조의 횡단면적 (m^2)

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치

본 연구에서 실험 장치를 크게 분류하면 저장조, 온수 공급 탱크(Rheem Manufacturing cop., Model 81V120D), 유량계 및 측정 장치 등으로 이루어져 있다.



1. Experimental storage tank 2. Hot water supply tank 3. Flow meter
4. Surge tank 5. Thermocouple probe 6. Data logger
7. Computer 8. Printer 9. Hybrid recorder
10. Automatic voltage regulator

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

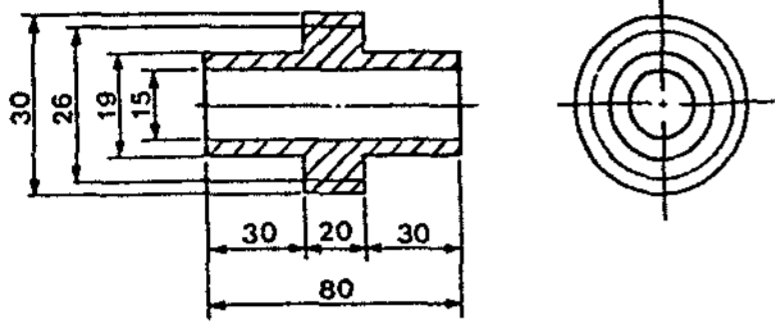


Fig. 2 (a) Inlet part type

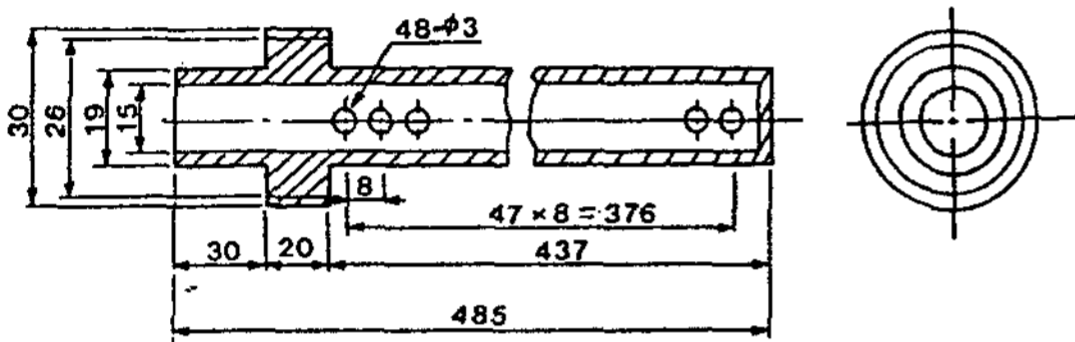


Fig. 2 (b) Perforated distributor type

저장조 내의 온도 측정을 위하여 Data Logger(Model FLUKE 2285B)를 사용하였으며, Fig. 1은 본 실험에서 사용한 실험 장치의 개략도를 보여 준다.

저장조는 수직 원통조로서 두께가 10mm인 아크릴로 제작하였으며 용량은 200l이다. 유입구 형상으로는 단순 유입구 형태와 perforated distributor 형태를 사용하였으며 이에 대한 상세도는 Fig. 2와 같다.

온도는 직경이 0.3mm인 T형 열전대를 이용하여 유입구 위치로부터 수직 하류 방향으로 53.3mm의 등 간격으로 스테인레스 봉에 25개를 삽입하여 측정하였다.

3.2 실험 방법

- (1) 실험 조건에 알맞은 작동 유체 온도를 세팅한 후 충분한 시간을 기다린다.
- (2) 초기 저장수로 사용될 냉수를 실험 저장조의 용량인 200 Liter 까지 채우고 저장조 내의 상

태가 안정될 때까지 약 5-6분 정도 기다린다.

- (3) 작동 유체의 온도가 설정한 온도에 도달할 때까지 바이패스 시킨다.
- (4) 작동 유체의 온도가 요구되는 온도에 도달하게 되면 순간적으로 유입구에 설치된 볼밸브를 열면서 바이패스 밸브를 잠근다.
- (5) 작동 유체가 공급되는 순간부터 축열 장치에 설치된 열전대를 통하여 온도 측정 장치인 Data Logger를 작동시켜 저장조 내의 초기 저장수가 한 번 순환될 때까지 저장조 내의 온도거동을 2분 간격으로 연속적으로 검출한다.
- (7) 실험이 종료되면 각종 인자들을 변화시켜서 반복수행한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 저장조 내의 온도 분포에 관한 해석

Fig. 3과 Fig. 4는 단순 유입구 형태를 사용하였을 경우 무차원 온도와 높이의 변화에 따른 저장조 내의 온도 구배를 나타낸다.

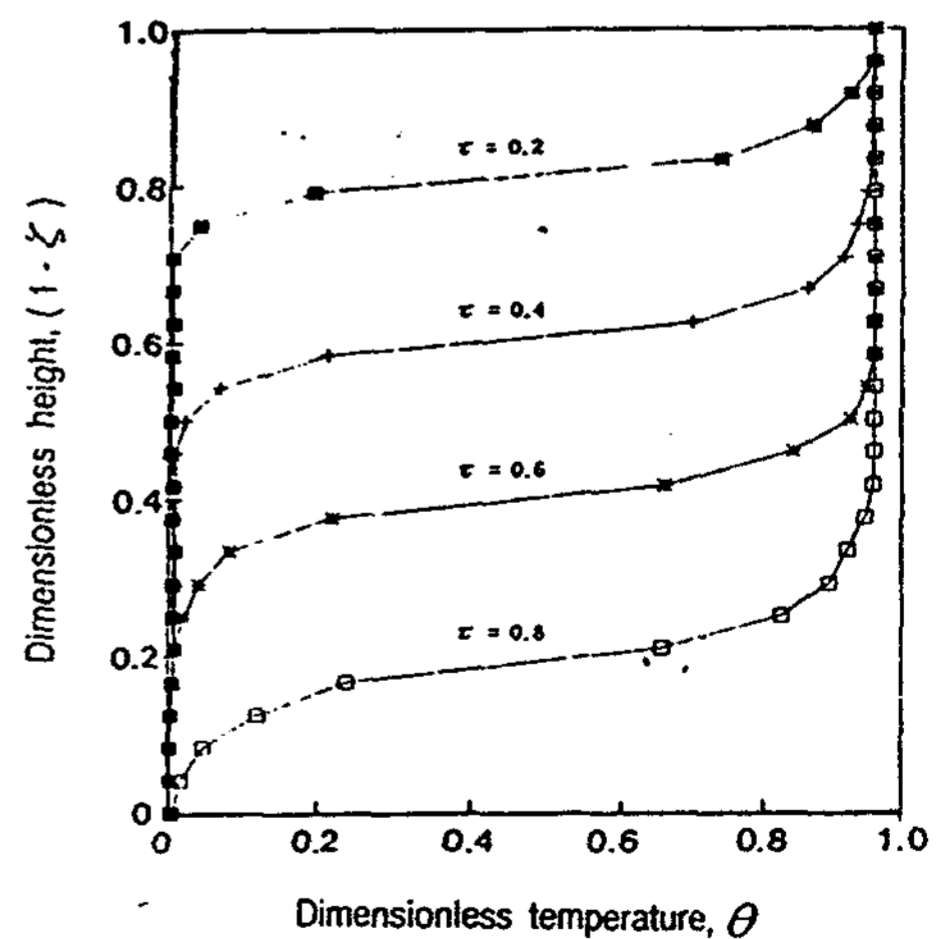


Fig. 3 Temperature profile in a Storage tank due to the variation of dimensionless time, using inlet port type.(Q=0.4 LPM)

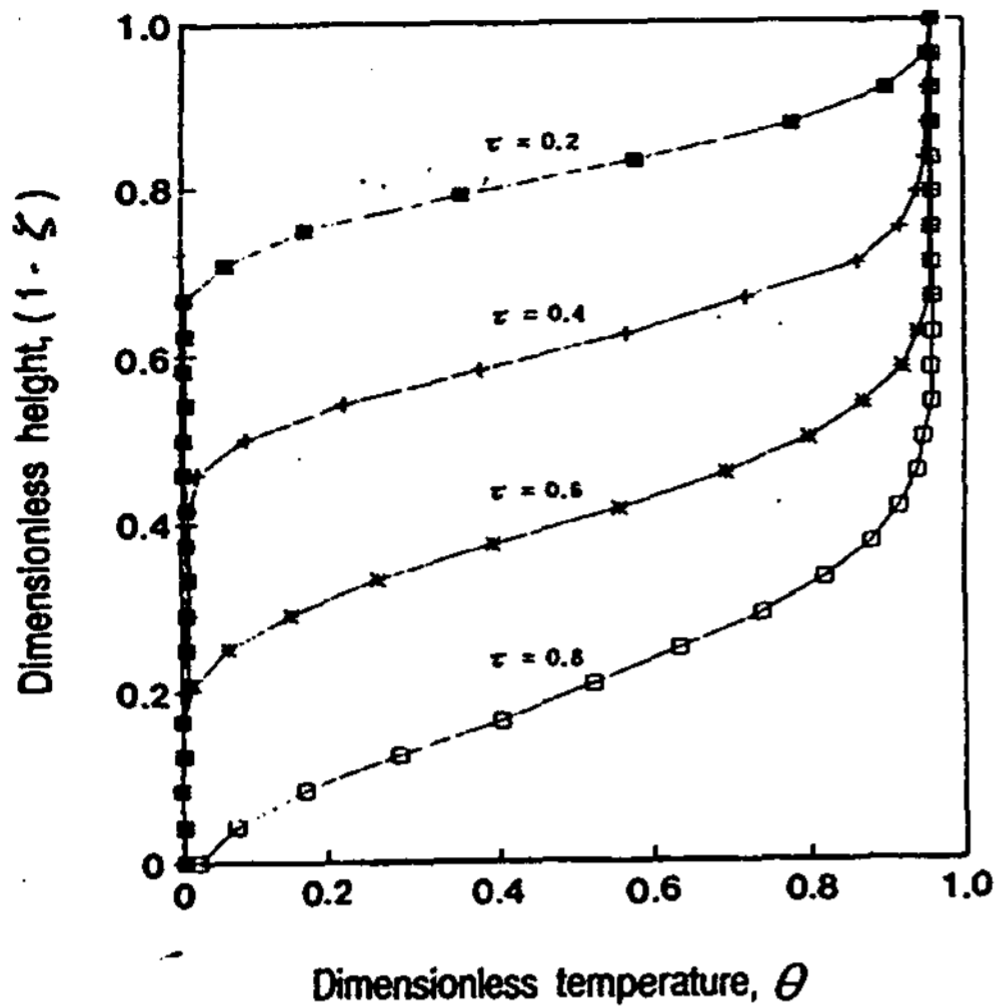


Fig. 4 Temperature profile in a Storage tank due to the variation of dimensionless time, using inlet port type.(Q=0.8 LPM)

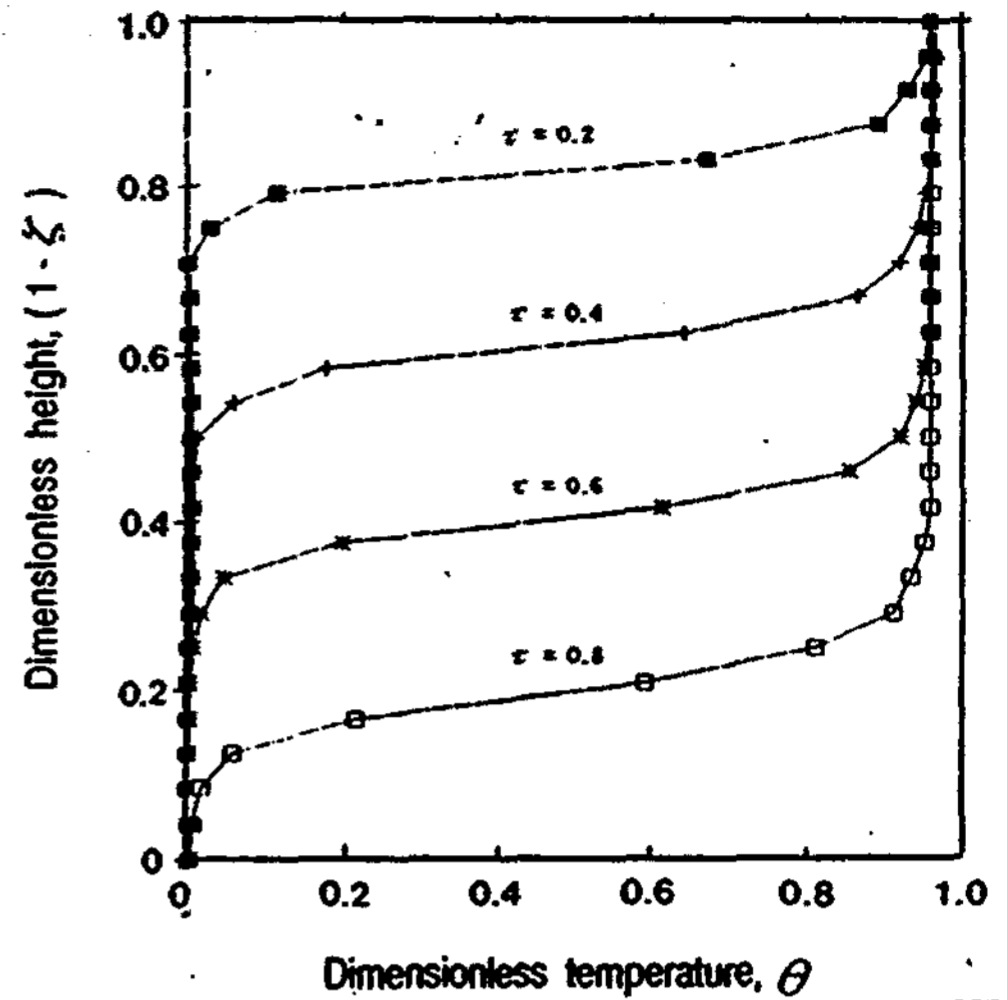


Fig. 5 Temperature profile in a storage tank due to the variation of dimensionless time, using perforated distributor type.(Q=0.4 LPM)

Fig. 3은 유입 유동율이 가장 낮은 0.4 LPM일 때의 온도 구배로서 Fig. 4의 0.8 LPM과 비교해 볼 때 상대적으로 천이 온도 구배층의 기울기가 가파른 것을 보여준다. 이는 장기 성층 온수저장 시스템의 중간 경계면에서 혼합 정도를 나타내는 유효 열 확산(Effective Thermal diffusivity)이 커지기 때문이고, 유입 유동율이 비록 저유량이지만 점차 증가할 수록 저장조 상부로 들어오는 유입수가 일정한 관성력, 부력 및 점성력으로 인하여 동반 유동(entrainment flow)을 하게 되어 혼합을 가중시키기 때문이다.

Fig. 5와 Fig. 6은 perforated distributor 형태를 사용하였을 경우 저장조 내의 온도 구배를 나타낸다. 이것도 단순 유입구 형태를 사용한 경우와 마찬가지로 유입 유동율이 증가할 수록 천이 온도 경계층의 기울기가 완만하게 변화되는 것을 보여준다. 저장조 상부로 유입되는 고온수가 초기 저장수와 혼합을 억제시키면서 저장조 하부로 피스톤 유동이 일어나도록 하기 때문에 0.8 LPM인 경우 단순 유입구를 사용한 경우보다 온도 경계

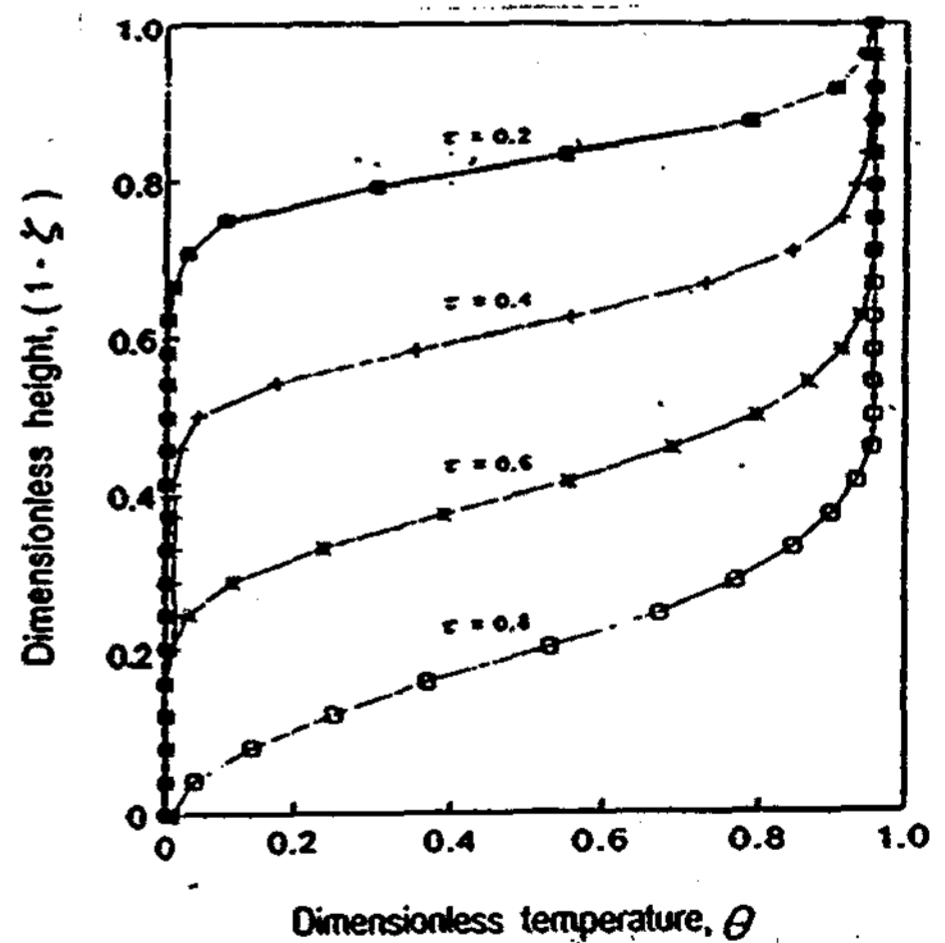


Fig. 6 Temperature profile in a storage tank due to the variation of dimensionless time, using perforated distributor type.(Q=0.8 LPM)

층이 더 가파르게 나타났다. 그러나 0.4 LPM인 경우는 별 차이가 없었다. 그 이유는 관성력이 작

아서 순수한 부력에 의한 영향만이 작용하기 때문이고 또한 이 때에 중간 경계면에서의 혼합 정도에 perforated distributor가 별 영향을 미치지 않음을 보여 준다.

4.2 유효 열확산 계수에 관한 해석

중간 경계면에서의 상부의 고온수에서 하부의 저온수로 확산되는 열은 장기 온수 저장 시스템에서 성층을 파괴시키는 주요 요인이다.

Fig. 7은 중간 경계면에서 혼합 정도를 나타내는 유효 열확산 계수를 정량화하여 Pe 수와의 관계를 나타낸 것이다. 이 Pe 수는 2절의 (5)식에서 알 수 있듯이 중요 물성치인 열 확산 계수와 속도항을 포함하므로 비교 매개 변수로 설정하였다.

Fig. 7에서와 같이 일회 충수 시간이 짧을 수록, 즉 Pe 수가 증가할 수록 유효 열확산계수의 값은 점차로 증가하였다. 그리고 유입구 형상으로서 perforated distributor를 사용한 경우가 단순 유입구를 사용한 경우보다 Pe 수가 증가함에 따라 성층 파괴가 감소됨을 보여 준다.

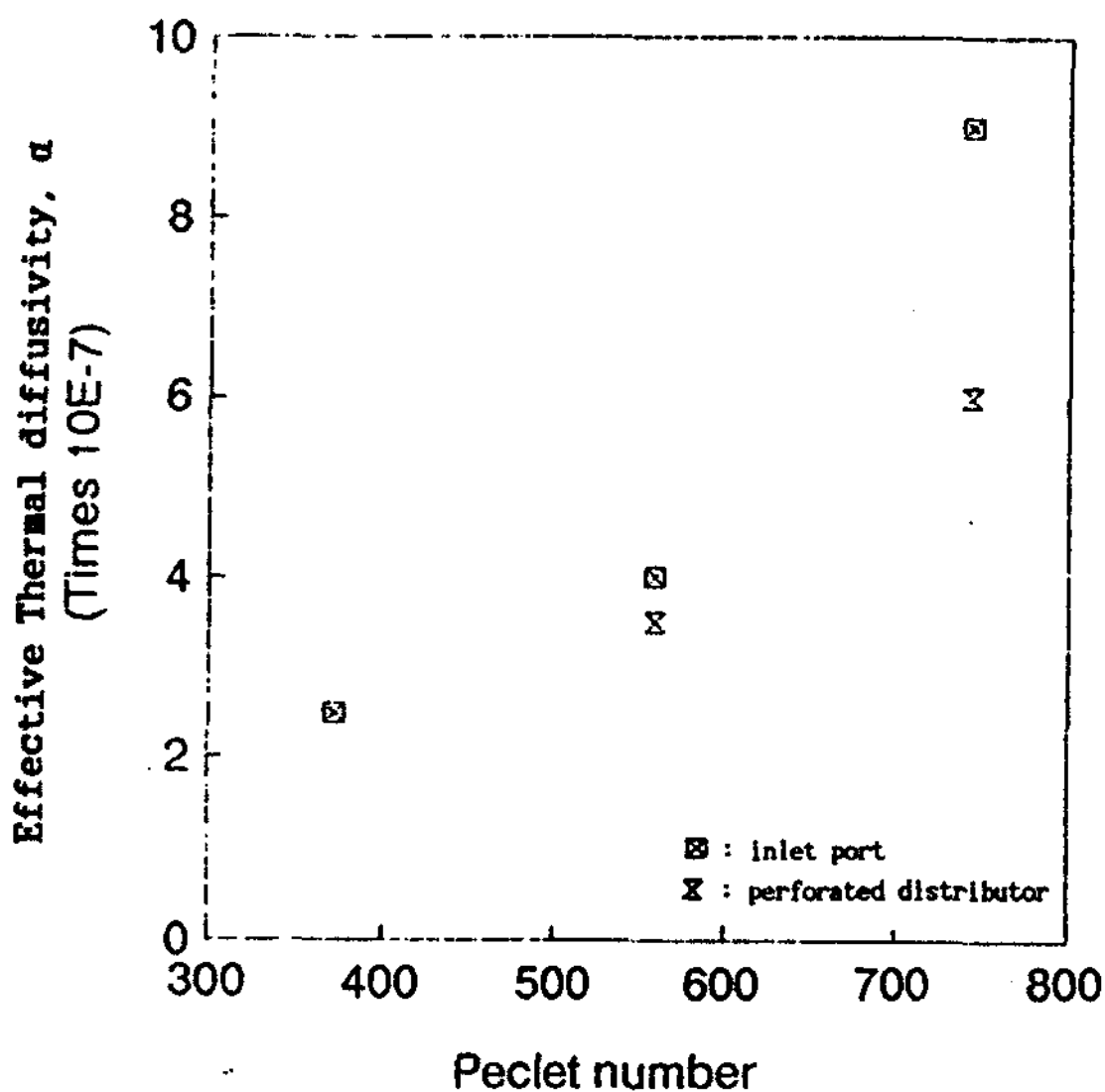


Fig. 7 Effective Thermal diffusivity effected inlet geometry as a function of Peclet number

4.3 축열효율에 관한 해석

Pe 수에 대해서 이론 축열효율의 상관관계는 Fig. 8에서와 같이 Pe 수가 증가할 수록 이론 축열효율도 증가함을 알았다. 이는 일회 충수 시 이는 perforated distributor를 사용한 경우 중간 경계면에서의 교란을 방지한다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 과거 연구에서도 유량이 증가할 수록 성층도가 감소하는 경향을 보이므로 과거 연구 결과와 일치함을 알 수 있다.

간이 감소할 수록 이론적으로 중간 경계면에서 저온의 하부로 전도에 의해서 손실된 열량이 점차 작아짐을 나타낸다. 그러나 이론 축열효율은 유입 유동율에 의한 중간 경계면에서의 교란을 고려하지 않고 단지 전도에 의한 손실만을 고려하였기 때문에 장기 성층 온수 저장조의 횡단면적이 상대적으로 큰 경우에 기초 설계 자료로 제공될 수 있다. 또한 성층축진 기구를 사용하여 이상적으로 피스톤 유동을 형성시키면 이론 축열효율을 적용할 수 있다.

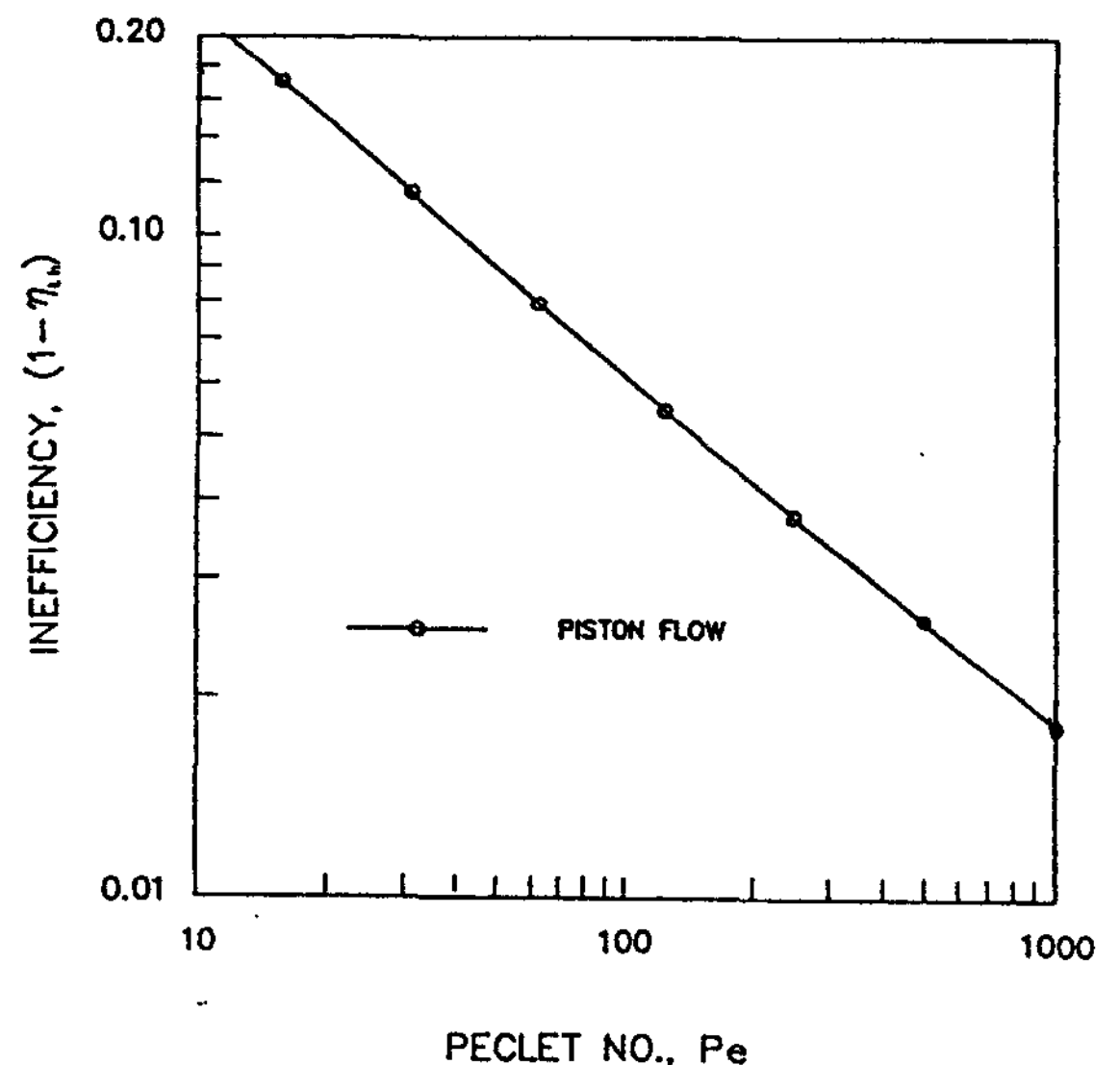


Fig. 8 Theoretical thermal storage inefficiency as a function of Peclet number

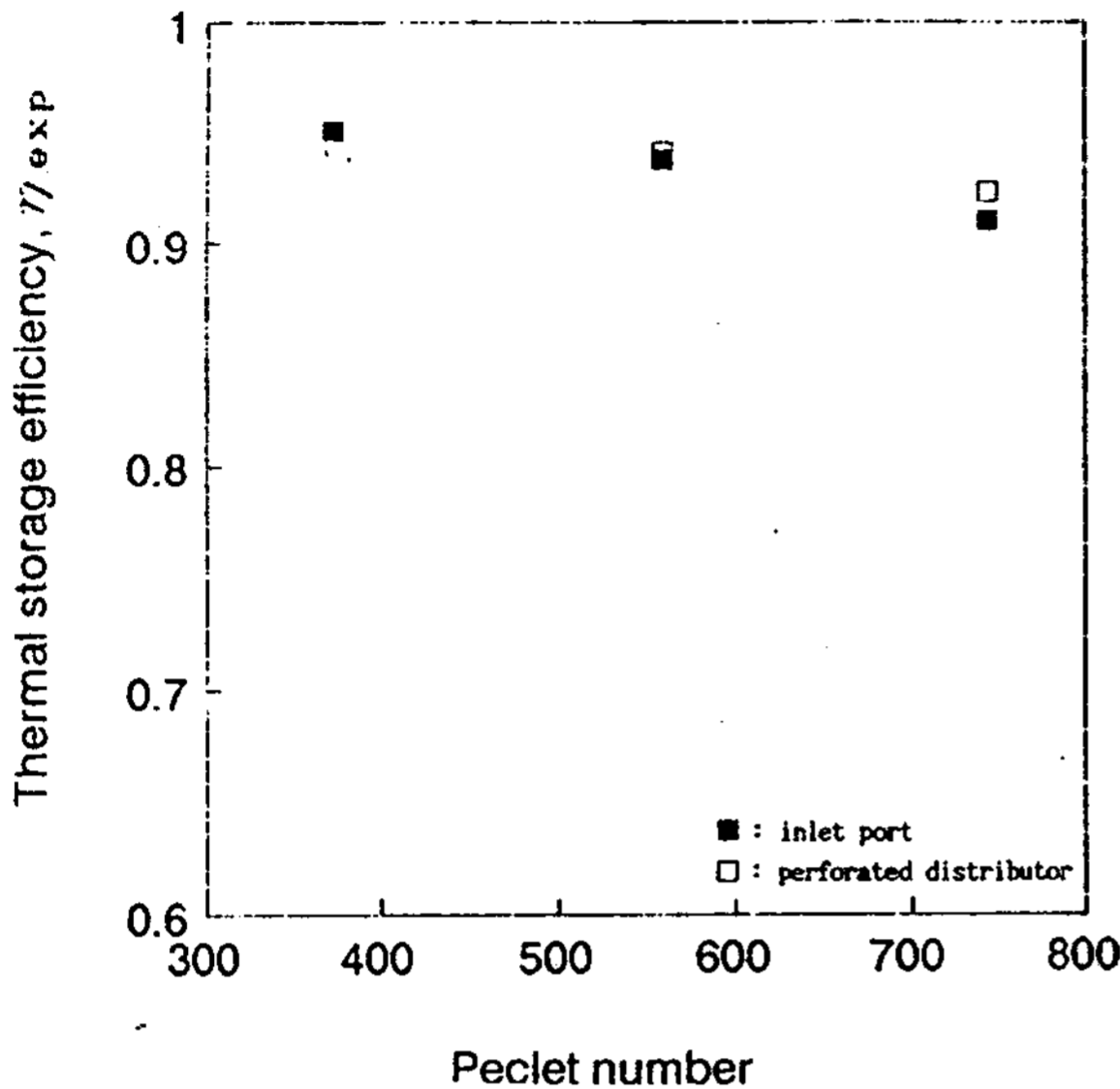


Fig. 9 Thermal storage efficiency effected inlet geometry as a function of Peclet number with water.

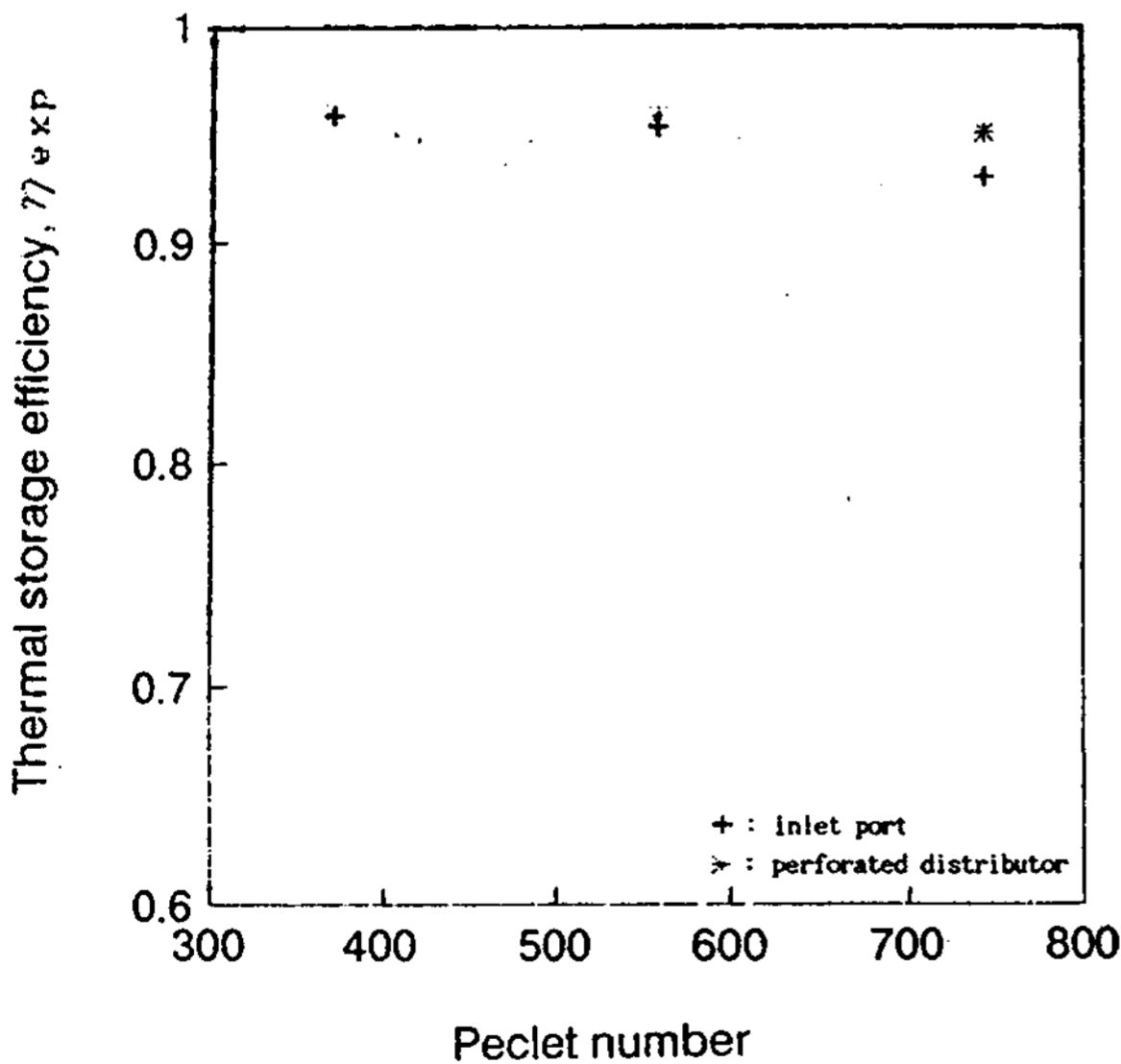


Fig. 10 Thermal storage efficiency effected inlet geometry as a function of Peclet number with air.

Fig. 9는 초기 저장수가 있을 때 각각의 유입구 형상에 따른 Pe 수에 대한 축열효율을 나타낸다. 여기서 알 수 있듯이 Pe 수가 증가할수록 축열효율은 점차로 감소하는데 그 감소폭은 유입구 형상으로서 perforated distributor를 사용한 경우보다 단순 유입구를 사용한 경우가 다소 더 크다는 것을 알수있다. 또한 Fig. 10은 초기 저장수가 없을 때 각각의 유입구 형상에 대하여 Pe 수에 대한 축열효율을 나타낸다. 여기서도 Fig. 9와 같이 Pe 수가 증가할수록 축열효율은 감소하고 단순유입구를 사용할 때가 그 감소폭이 더 크음을 보여준다. Fig. 11에서 보듯이 전체적으로 초기 저장수가 있는 경우보다 없는 경우가 축열효율이 더 높음을 알 수 있다.

그러므로 중간 경계면에서 교란에 의한 열손실이 열전도에 의한 손실보다 우세한 온수 저장 시스템에서 효과적인 저장 방법은 일회 충수 시간이 길고 유입구 형상으로써 성층 축진 기구를 사용하였을 때라는 결과를 얻었다.

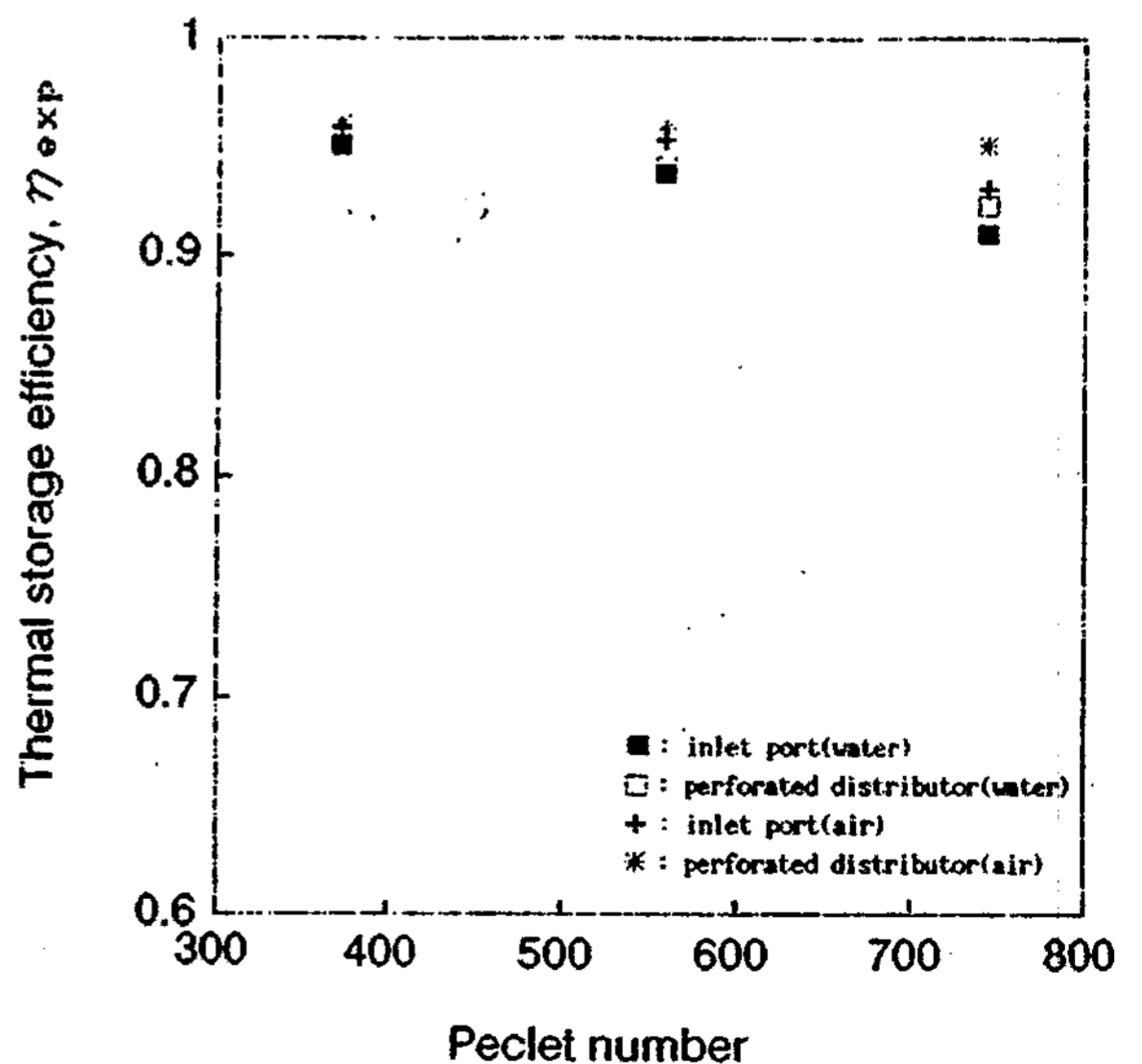


Fig. 11 Thermal storage efficiency effected inlet geometry as a function of Peclet number

5. 결 론

본 연구에서는 성층 온수 저장 과정 중 과도 열거동에 관한 이론적 해석을 통해서 이론 축열 효율에 관한 식을 유도·확립하였고 동적·기하학적 인자를 변화시키며 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 이론 축열효율(η_{th})은 중간 경계면에서 열전도에 의한 손실이 교란보다 우세한 경우 일회 충수 시간이 짧을수록 즉, Pe 수가 증가할수록 증가한다.

(2) Pe 수가 증가할수록 유효 열확산 계수의 값이 점차 커지고, 유입구 형상으로서 성층축진기구인 perforated distributor 형태를 사용하면 단순 유입구 형태보다 유효 열확산 계수의 값이 작음을 알 수 있다.

(3) 실험에 의한 축열효율(η_{exp})은 초기 저장수가 있는 경우와 없는 경우 모두 유입 유동율이 가장 낮을 때 가장 높았다. 초기 저장수가 있는 경우 유입 유동율이 가장 낮을 때 유입구 형상에 관계 없이 가장 높은 95.1 % 의 실험에 의한 축열효율을 얻었고 초기 저장수가 없는 경우 유입구 형상으로서 perforated distributor를 사용했을 때 96 % 로 가장 높은 실험에 의한 축열효율을 얻었다. 그러므로 효과적인 온수 저장 방법은 유입 유동율을 낮게 하고 유입구 형상으로서 perforated distributor 형태를 사용하며 초기 저장수가 없는 경우이다.

참 고 문 헌

1. S. Kakac et al, "Energy Storage System", Kluwer Academic Publishes, pp.129~161, 1989.
2. A. A. M. Sayigh, "Solar Energy Engineering", Academic Press, pp.325~329, 1977.
3. R. W. Mar and T. T. Bramlette, "Solar Energy Technology Handbook", pp.811~839.
4. C. den Ouden et al, "Thermal Storage of Solar Energy", pp.173~258.
5. Z. Lavan and J. Thompson, "Experimental Study of Thermally Stratified Hot Water Storage Tanks", Solar Energy, Vol.19, pp.519~524, 1977.
6. Y. Jaluria and S.K. Gupta, "Decay of Thermal Stratification in A Water Body for Solar Energy Storage", Solar Energy, Vol.28, No.2, pp.137~143, 1982.
7. S. T. Wuand, S. M. Han, "A Liquid Solar Energy Storage Tank Model-1 Formulation of A Mathematical Model", ASME, New York, pp.53~60, 1985.
8. K. G. T. Hollands and M. F. Lightstone, "A Review of Low Flow Stratified Tank Solar Water Heating Systems", Solar Energy, Vol.43, pp.97~105, 1989.
9. Ee-Tong Pak, "Thermally Stratified Hot Water Storage", Solar World Congress, Vol.2, Part I, pp.1417~1423, 1991.

A Study on Transient Thermal Behavior During the Charging Process in a Stratified Water Storage Tank and Its Storage Efficiency

E. T. Pak^{*}, Y. J. Chu^{}, Y. H. Kim^{***}**

* *Sung Kyun Kwan University*

** *Korea Electric Power Research Institute*

*** *Pohang Iron & Steel Co. Ltd.*

Abstract

In this study, the theoretical equation of thermal storage efficiency was established to applied long term hot water storage system.

The effective thermal diffusivity and storage efficiency were measured through the experiment to predict the degree of mixture in thermal storage tank.

The effective thermal diffusivity was inversely proportional to the storage efficiency. The most effective storage efficiency was obtained under condition of low flow rate and using the perforated distributor.